第40卷 第7期
2023年7月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 7
Jul. 2023

晋西黄土区不同密度刺槐林下植物群落物种多样性

王思淇[1]， 张建军[1,2,3,4]， 张彦勤[5]， 赵炯昌[1]， 胡亚伟[1]，
李 阳[1]， 唐 鹏[1]， 卫朝阳[1]

（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站，山西 吉县 042200；3. 北京林业大学，水土保持国家林业局重点实验室，北京 100083；4. 北京林业大学，教育部林业生态工程研究中心，北京 100083；5. 山西吉县红旗国有林场，山西 吉县 042200）

摘 要：林分密度对刺槐（*Robinia pseudoacacia*）林下植物群落结构及物种多样性具有重要影响，明确不同林分密度刺槐林下植物群落结构及物种多样性变化有助于黄土区植被恢复与森林生态功能的提升。以晋西黄土区刺槐人工林为研究对象，通过野外调查，探究6种林分密度（950株·hm^{-2}、1450株·hm^{-2}、1950株·hm^{-2}、2450株·hm^{-2}、2950株·hm^{-2}、3450株·hm^{-2}）条件下林下植物群落组成特征、生长特征及物种多样性。结果显示：（1）研究区林下植物共有39科65属77种，其中灌木16科29属36种，草本植物25科36属41种，灌木层物种数在林分密度为1950株·hm^{-2}时最多，草本层物种数在林分密度为2450株·hm^{-2}时最多。刺槐林下植物群落主要以蔷薇科（Rosaceae）、菊科（Compositae）、禾本科（Gramineae）、忍冬科（Caprifoliaceae）的植物为主，随着林分密度增加，优势种由阳生、中生性物种向阴生性物种过渡。（2）刺槐林中灌木的高度、地上生物量随林分密度的增加而减小，草本植物地上生物量在各林分密度间无明显差异（$P>0.05$），灌草群落总盖度变化较小。（3）随着刺槐林分密度的增加，灌木层Margalef丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数呈先增后减的变化趋势，在林分密度为1950株·hm^{-2}时最大，Simpson优势度指数、Pielou均匀度指数呈逐渐减小的变化趋势。草本层Margalef丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数在林分密度为2450株·hm^{-2}时最大，Simpson优势度指数、Pielou均匀度指数在林分密度为1950株·hm^{-2}时达到最大。（4）不同密度的刺槐林下植物群落物种组成相似度达中等相似以上。林分密度为1950~2450株·hm^{-2}时，刺槐林下植物群落物种多样性最佳，有利于其生态功能的提高与可持续发挥。

关键词：林分密度；刺槐人工林；群落结构；物种多样性；晋西黄土区

森林是地球上最重要的生态系统之一，群落结构复杂，生物多样性丰富，是植物生长和能量交换的关键场所[1]。植物物种多样性作为生物多样性的重要组成部分，是植物群落结构的重要指标，其不仅能够反映植物群落在组成、结构、功能等方面的差异，又能表征不同自然地理条件下群落与环境因子间的相互关系[2-3]。林下灌草群落作为森林生态系统的重要组成部分，在维持物种多样性和人工林稳定方面起着十分重要的作用[4]。因此，如何合理维持并提高林下物种多样性，对于森林经营和生态恢复具有重要意义。

林下物种多样性受到林分密度[5-6]、林龄[7-8]、演替阶段[9]、林分配置[10-11]等许多因素的影响，其中林分密度作为重要的林分结构特征[12]，其差异会加速林木分化以及群落演替，从而对林下物种多样性产生影响。关于林分密度对林下物种多样性的影响已有不少报道，Ashfaq等[13]对湖北太子山3种林分密度马尾松（*Pinus massoniana*）林下物种多样性进行了研究，指出较低密度林分（1212株·hm^{-2}）的灌木和草本植物多样性较高，且草本层的物种丰富度高于灌木层；刘建利等[5]对黄土区刺槐（*Robinia pseudoacacia*）林下物种多样性进行研究后指出，随着林分密度的增大，林下物种多样性指数呈减少趋势；王媚臻等[6]对四川云顶山5种林分密度柏木（*Cupres-*

收稿日期：2023-04-13； **修订日期：**2023-06-02
基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFE0104700）
作者简介：王思淇（1998-），女，硕士研究生，主要从事林业生态工程研究. E-mail: wangsiqi199804@163.com
通讯作者：张建军. E-mail:zhangjianjun@bjfu.edu.cn

sus funebris)林下物种多样性进行调查后得出，林分密度为650株·hm^{-2}时林下物种多样性最佳；云慧雅等[10]、赵耀等[11]在晋西黄土区对不同林分类型和密度条件下的灌草群落多样性进行了相关研究，发现林分密度为1200~1600株·hm^{-2}时天然次生林及人工混交林物种多样性最好。可见，关于林分密度对林下物种多样性的研究尚未形成一致的结论，因此，林分密度与林下物种多样性的关系还需进一步探讨。

黄土高原位于黄河中游，水土流失严重，是典型的生态退化区[14]。20世纪50年代以来国家在黄土高原实施了大规模的植被恢复，形成了较为完善的防护林体系，对于防治水土流失、改善生态环境起到了重要作用[15]。刺槐因适应性强、耐干旱贫瘠，作为水土保持树种在黄土高原被广泛栽植。山西吉县蔡家川流域于上世纪90年代营造了大面积的刺槐林，随着刺槐林的生长和耗水量的增加，生长量小和生态服务功能低下的弊病凸显[16]。因此，基于物种多样性确定最佳造林密度和营林密度，开展水土保持林的抚育管理，可保障黄土区水土保持高质量发展和生态服务功能可持续发挥[17-18]。为此，本文以晋西黄土区蔡家川流域内6种林分密度的人工刺槐林为研究对象，通过野外样地调查，分析刺槐人工林下植物群落的组成特征、生长特征及物种多样性指数随林分密度的变化，探讨林分密度与林下物种多样性相互关系，确定适宜的水土保持林经营管理密度，以期为黄土高原刺槐人工林生态功能提升和可持续发展提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站所在地蔡家川流域(36°14′27″~36°18′23″N；110°39′45″~110°47′45″E)，该流域属于黄河三级支流，是典型的梁状丘陵沟壑区，暖温带半干旱大陆性气候，土壤类型为褐土，黄土母质。平均海拔为1172 m(图1)。年平均降水量579 mm，年际变化较大，汛期多有暴雨。年平均气温为10 ℃，平均无霜期150 d。土壤类型为褐土，黄土母质。蔡家川流域内人工林以刺槐、油松(*Pinus tabuliformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)为主，林下植被以菊科(Compositae)、禾本科(Gramineae)、蔷薇科(Rosaceae)的物种为主，代表性的植物种有黄刺玫(*Rosa xanthina*)、土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)、茅莓(*Rubus parvifolius*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、蒌蒿(*Artemisia selengensis*)、虉草(*Phalaris arundinacea*)、紫丁香(*Syringa oblata*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置及调查　于2022年5—9月在蔡家川流域以生长状况良好、林相结构完整且林龄均为30 a的典型人工刺槐林为研究对象，选择6种林分密度(950株·hm^{-2}、1450株·hm^{-2}、1950株·hm^{-2}、2450株·hm^{-2}、2950株·hm^{-2}、3450株·hm^{-2})，每种密度选择3个20 m×20 m的样地进行调查，共计调查样地18个。每个样地的坡向、海拔和坡度等条件基本一

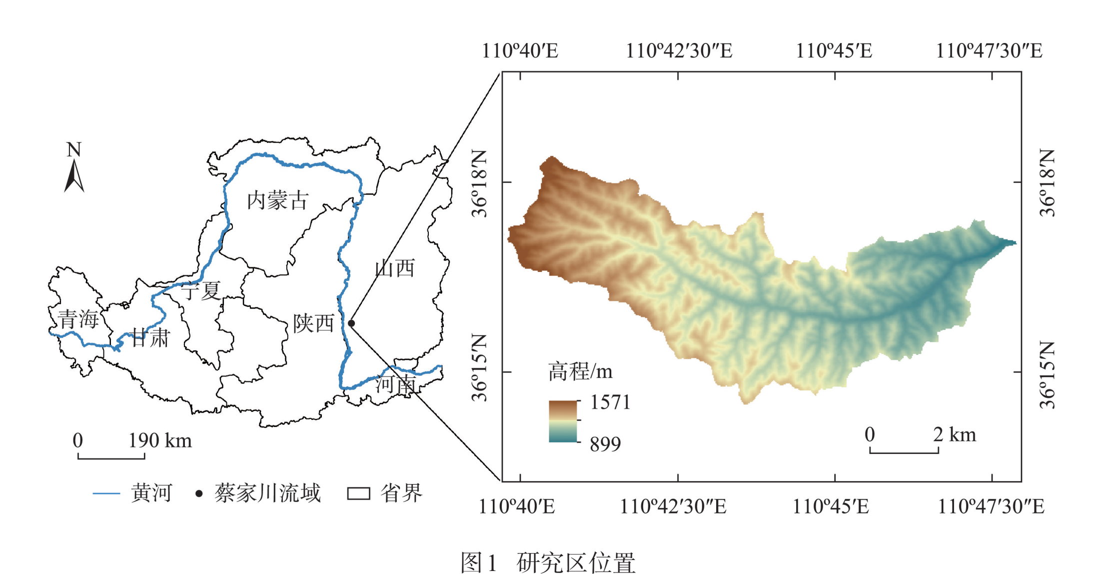


图1 研究区位置

Fig. 1 Research area location

致,并在每个样地内进行每木检尺,记录树高、胸径、冠幅、株数等信息。在标准样地内的四角和中心位置共设置5个5 m×5 m的灌木样方,在每个灌木的样方内设置5个1 m×1 m的草本样方,每个样地共25个草本样方。调查并记录每个样方内出现的灌木和草本植物名称、数量、高度、盖度等指标,将藤本植物和乔木(高度<2 m)幼苗记录在灌木层。样地经纬度、坡度坡向及海拔通过GPS和罗盘测定。样地信息如表1所示。

1.2.2　灌木和草本植物地上生物量的测定　在每个样地内的灌木样方和草本样方内采用"全株收获法",将样方内地上部分全部收获,称量鲜重后部分装入自封袋并带回实验室内,将取回的样品放入75 ℃的烘箱中烘干至恒重,记录烘干后重量,然后计算样地内灌草生物量。

1.2.3　物种多样性测度　本研究灌木层和草本层各物种的重要值(Important Value,IV)、Margalef丰富度指数(R)、Simpson优势度指数(D)、Shannon-Wiener多样性指数(H)、Pielou均匀度指数(J_{sw})及Jaccard相似系数(q)计算方法参照文献[19-20],计算公式如下:

重要值(IV):

$$IV=\left(R_d+R_f+R_c\right)/3 \quad (1)$$

$$R_d=\frac{N_i}{N}\times 100\% \quad (2)$$

$$R_f=\frac{S_i}{\sum S_i}\times 100\% \quad (3)$$

$$R_c=\frac{A_i}{\sum A_i}\times 100\% \quad (4)$$

Margalef丰富度指数(R):

$$R=\frac{S-1}{\ln N} \quad (5)$$

Simpson优势度指数(D):

$$D=1-\sum P_i^2 \quad (6)$$

Shannon-Wiener多样性指数(H):

$$H=-\sum P_i\ln P_i \quad (7)$$

Pielou均匀度指数(J_{sw}):

$$J_{sw}=\frac{H}{\ln S} \quad (8)$$

Jaccard相似系数(q):

$$q=\frac{a}{(a+b+c)} \quad (9)$$

式中:R_d、R_f、R_c为相对密度、相对频度、相对盖度;S为样方中物种总数;P_i为第i种的相对个体数,即个体数/物种总数(N_i/N),N为样方内全部种

表1　样地基本信息

Tab. 1　Basic information of sample site

样地号	密度/(株·hm^{-2})	海拔/m	坡度/(°)	坡向	平均树高/m	平均胸径/cm	密度类型
1	950	1109.36	23	阳坡	9.89±2.74c	13.88±4.32b	低密度
2	950	1110.55	27	阳坡	9.58±2.38c	10.35±3.75c	低密度
3	950	1120.01	23	阳坡	12.46±2.12a	15.38±4.65a	低密度
4	1450	1079.94	22	阳坡	10.53±3.22b	13.74±4.11b	低密度
5	1450	1145.28	25	阳坡	9.88±2.59cd	9.77±4.57cde	低密度
6	1450	1097.19	15	阳坡	9.59±2.67c	9.45±3.45cdef	低密度
7	1950	1112.79	26	半阳	5.40±2.18h	7.17±4.18gh	中密度
8	1950	1136.61	25	阳坡	11.73±2.90b	13.62±4.41b	中密度
9	1950	1172.14	26	半阳	8.18±2.56de	10.65±4.48c	中密度
10	2450	1082.51	27	阳坡	10.33±3.74c	10.03±4.55cde	中密度
11	2450	1076.93	18	阳坡	7.91±4.46de	8.31±5.43defgh	中密度
12	2450	1148.62	22	阳坡	7.10±2.85ef	8.98±5.12cdefg	中密度
13	2950	1133.16	31	阳坡	5.75±2.80gh	8.38±4.68defgh	高密度
14	2950	1021.88	25	阳坡	6.77±2.84fg	8.66±4.45fgh	高密度
15	2950	1068.08	20	阳坡	5.84±3.20gh	7.76±4.08fgh	高密度
16	3450	1066.27	36	阳坡	5.98±2.31gh	6.95±3.70h	高密度
17	3450	1066.95	14	阳坡	3.02±2.45i	8.61±4.98cdefgh	高密度
18	3450	1133.16	27	阳坡	3.34±2.11i	7.92±3.57fgh	高密度

注:表中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

的个体总数，N_i 为第 i 个物种的个体数；S_i 为第 i 个种在样方中出现的次数；A_i 为第 i 个种的盖度。a 为A和B两个群落共有的物种数，b 为A群落独有的物种数，c 为B群落独有的物种数。其中，$0.00 \leq q < 0.25$ 为极不相似，$0.25 \leq q < 0.50$ 为中等不相似，$0.50 \leq q < 0.75$ 为中等相似，$0.75 \leq q \leq 1.00$ 为极相似。

1.2.4 数据处理　用Excel 2019和SPSS 23.0软件进行数据统计整理分析，Origin 2017作图，采用SPSS 23.0软件进行单因素方差分析（One-way ANOVA），采用最小显著差数法（LSD）检验不同林分密度下各特征指标上的差异。

2 结果与分析

2.1 不同密度刺槐林下植物群落组成特征及重要值

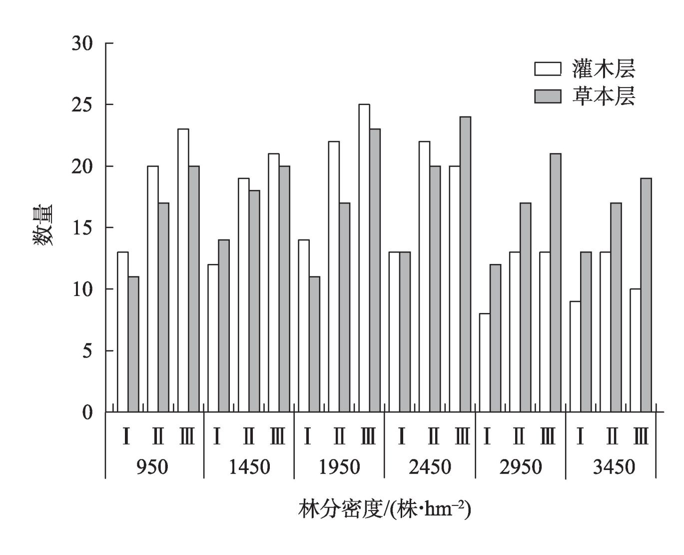
图2为不同密度刺槐林下植物群落物种组成图，由图2可知，在调查的6种林分密度的刺槐林中，共出现植物39科65属77种，其中灌木层植物共16科29属36种，草本植物共25科36属41种，这些植物中蔷薇科有14种、菊科11种、禾本科4种、忍冬科（Caprifoliaceae）3种，分别占物种总数的18.18%、14.29%、5.19%、3.90%。灌木层和草本层物种数均随着林分密度的增加呈先增后减的变化趋势，其中灌木层在密度为1950株·hm^{-2}时物种数可达25种，草本层在密度为2450株·hm^{-2}时物种数可达24种。灌草群落物种总数在密度为1950株·hm^{-2}时可达48种，而3450株·hm^{-2}时物种数仅有29种。

表2为不同密度刺槐林下植物群落物种的重要值表。从表2可见，灌木层主要优势种为茅莓、黄刺玫、杠柳（*Periploca sepium*）、紫丁香等，草本层主要优势种为藨草、铁杆蒿、针叶薹草（*Carex onoei*）等。当密度低于2950株·hm^{-2}时，灌木层的主要优势种为茅莓，黄刺玫为主要伴生种；当密度为2950株·hm^{-2}时，样地内主要优势种变为黄刺玫。当密度为3450株·hm^{-2}时，白刺花（*Sophora davidii*）成为样地内主要优势种，重要值达51.35%。草本层中，当密度为1450株·hm^{-2}时，芦苇（*Phragmites australis*）的重要值最大，为31.63%，这可能与土壤水分条件较好有关；当密度为2450株·hm^{-2}时，藨草的重要值达52.21%。可见，刺槐人工林在不同密度条件下灌木层优势种以阳生、中生的植物为主，草本层优势种以适应性强、适生幅度宽的中生性、阴生性物种为主。

2.2 不同密度刺槐林下植物群落生长特征

图3为不同密度刺槐林下植物群落的生长特征图。由图3可知，随林分密度的增加，灌木层的平均高度逐渐减小，密度为950株·hm^{-2}时灌木层的平均高度可达206 cm，密度为3450株·hm^{-2}时灌木层高度仅为103 cm。灌木层生物量随林分密度的增加而减小，在密度为950株·hm^{-2}时最大，达94.64 g·m^{-2}，显著高于其他5个密度群落（$P < 0.05$）。不同林分密度刺槐林中灌草层的总盖度变化不大，未达到差异显著水平（$P > 0.05$），但密度为950株·hm^{-2}时灌草层总盖度可达40.33%。

草本层生物量在各林分密度间波动性较小且



注：Ⅰ为科数；Ⅱ为属数；Ⅲ为种数。

图2 不同密度刺槐林下植物群落物种组成

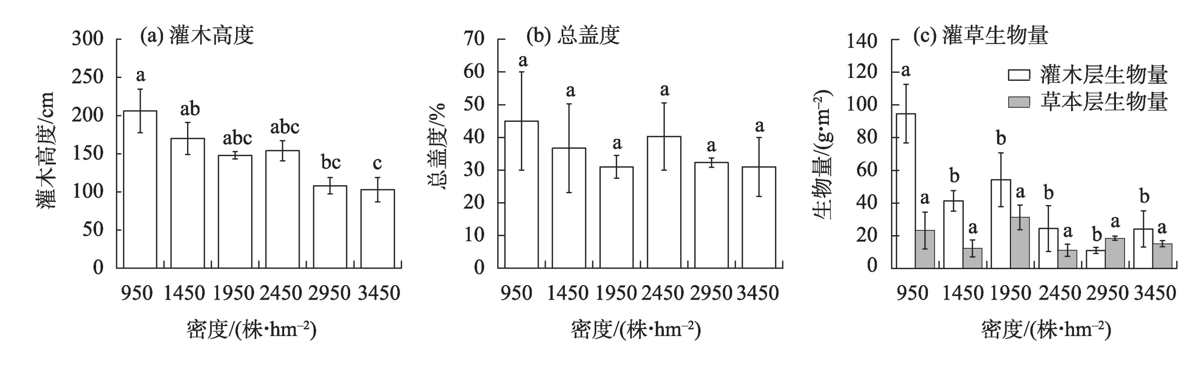
Fig. 2 Understory community species composition of *Robinia pseudoacacia* plantation with different densities

表2 不同密度刺槐林下植物群落物种重要值

Tab. 2 Important value of understory community species in *Robinia pseudoacacia* plantation with different densities

层次	林分密度/(株·hm^{-2})	主要物种及重要值/%
灌木层	950	茅莓(23.58)+黄刺玫(22.73)+栾树(20.44)+紫丁香(8.64)+白首乌(7.69) *Rubus parvifolius*(23.58)+*Rosa xanthina*(22.73)+*Koelreuteria paniculata*(20.44)+*Syringa oblata*(8.64)+*Cynanchum bungei*(7.69)
	1450	茅莓(37.79)+黄刺玫(19.81)+细裂槭(13.96)+土庄绣线菊(8.59)+杠柳(6.48) *Rubus parvifolius*(37.79)+*Rosa xanthina*(19.81)+*Acer stenolobum*(13.96)+*Spiraea pubescens*(8.59)+*Periploca sepium*(6.48)
	1950	茅莓(30.07)+黄刺玫(19.40)+杠柳(17.62)+紫丁香(14.50)+土庄绣线菊(11.76) *Rubus parvifolius*(30.07)+*Rosa xanthina*(19.40)+*Periploca sepium*(17.62)+*Syringa oblata*(14.50)+*Spiraea pubescens*(11.76)
	2450	茅莓(23.59)+黄刺玫(20.16)+土庄绣线菊(17.37)+杠柳(16.95)+海棠(9.82) *Rubus parvifolius*(23.59)+*Rosa xanthina*(20.16)+*Spiraea pubescens*(17.37)+*Periploca sepium*(16.95)+*Malus spectabilis*(9.82)
	2950	黄刺玫(21.27)+茅莓(20.15)+土庄绣线菊(18.66)+杠柳(12.97)+连翘(12.00) *Rosa xanthina*(21.27)+*Rubus parvifolius*(20.15)+*Spiraea pubescens*(18.66)+*Periploca sepium*(12.97)+*Forsythia suspensa*(12.00)
	3450	白刺花(51.35)+杠柳(16.08)+黄刺玫(12.47)+酸枣(10.30)+茅莓(9.66) *Sophora davidii*(51.35)+*Periploca sepium*(16.08)+*Rosa xanthina*(12.47)+*Ziziphus jujuba*(10.30)+*Rubus parvifolius*(9.66)
草本层	950	针叶薹草(24.64)+虉草(18.69)+芦苇(16.08)+铁杆蒿(12.41)+黑麦草(9.49) *Carex onoei*(24.64)+*Phalaris arundinacea*(18.69)+*Phragmites australis*(16.08)+*Artemisia gmelinii*(12.41)+*Lolium perenne*(9.49)
	1450	芦苇(31.63)+黑麦草(27.99)+青蒿(23.29)+马兜铃(15.57)+铁杆蒿(14.62) *Phragmites australis*(31.63)+*Lolium perenne*(27.99)+*Artemisia carvifolia*(23.29)+*Aristolochia debilis*(15.57)+*Artemisia gmelinii*(14.62)
	1950	铁杆蒿(37.15)+漏芦(20.09)+青蒿(18.96)+蒌蒿(10.41)+茜草(8.11) *Artemisia gmelinii*(37.15)+*Rhaponticum uniflorum*(20.09)+*Artemisia carvifolia*(18.96)+*Artemisia selengensis*(10.41)+*Rubia cordifolia*(8.11)
	2450	虉草(52.21)+铁杆蒿(15.59)+青蒿(10.24)+蒌蒿(9.08)+黑麦草(7.15) *Phalaris arundinacea*(52.21)+*Artemisia gmelinii*(15.59)+*Artemisia carvifolia*(10.24)+*Artemisia selengensis*(9.08)+*Lolium perenne*(7.15)
	2950	铁杆蒿(30.55)+沼生繁缕(17.47)+青杞(16.35)+虉草(12.89)+青蒿(10.76) *Artemisia gmelinii*(30.55)+*Stellaria palustris*(17.47)+*Solanumse ptemlobum*(16.35)+*Phalaris arundinacea*(12.89)+*Artemisia carvifolia*(10.76)
	3450	针叶薹草(21.53)+野菊(19.79)+虉草(17.21)+铁杆蒿(15.88)+葎草(11.10) *Carex onoei*(21.53)+*Chrysanthemum indicum*(19.79)+*Phalaris arundinacea*(17.21)+*Artemisia gmelinii*(15.88)+*Humulus scandens*(11.10)

注:表中仅列出灌木层和草本层中重要值为前5的物种。



注:图中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图3 不同密度刺槐林下植物群落生长特征变化

Fig. 3 Changes of understory community growth characteristics of *Robinia pseudoacacia* plantation with different densities

无明显差异($P>0.05$),在密度为1950株·hm^{-2}时草本层的生物量最大,可达31.29 g·m^{-2}。灌草总生物量在密度为950株·hm^{-2}时最大,达117.82 g·m^{-2},在密度为2950株·hm^{-2}时最小,仅为29.47 g·m^{-2}。

2.3 不同密度刺槐林下植物群落物种多样性特征

图4为不同密度刺槐林下植物群落物种多样性指数的变化特征图。由图4可知,Margalef指数、Shannon-Wiener指数、Simpson指数和Pielou指数在不同林分密度间均无显著差异($P>0.05$)。随着林分密度的增加,灌木层Margalef指数、Shannon-Wiener指数大体呈现先增后减的变化趋势,均在密度为1950株·hm^{-2}时出现最大值,Simpson指数、Pielou指数则随着林分密度的增加而逐渐下降;草本层R、H在密度为2450株·hm^{-2}时达到最大,D、J_{sw}无明显变化规律,均在密度为1950株·hm^{-2}时达到最大。

2.4 不同密度刺槐林下植物群落相似性

表3为不同密度刺槐林下植物群落的相似性系数表。由表3可知,不同林分密度刺槐林下植物群落组成具有较高的相似性,各群落Jaccard系数均大于0.5,即中等相似以上。其中在密度为2950株·hm^{-2}和3450株·hm^{-2}时,Jaccard系数最大,达到0.8023,属于极相似水平;在密度为950株·hm^{-2}和3450株·hm^{-2}时,Jaccard相似性系数最小,仅为0.6076。这表明蔡家川流域刺槐林高密度群落之间

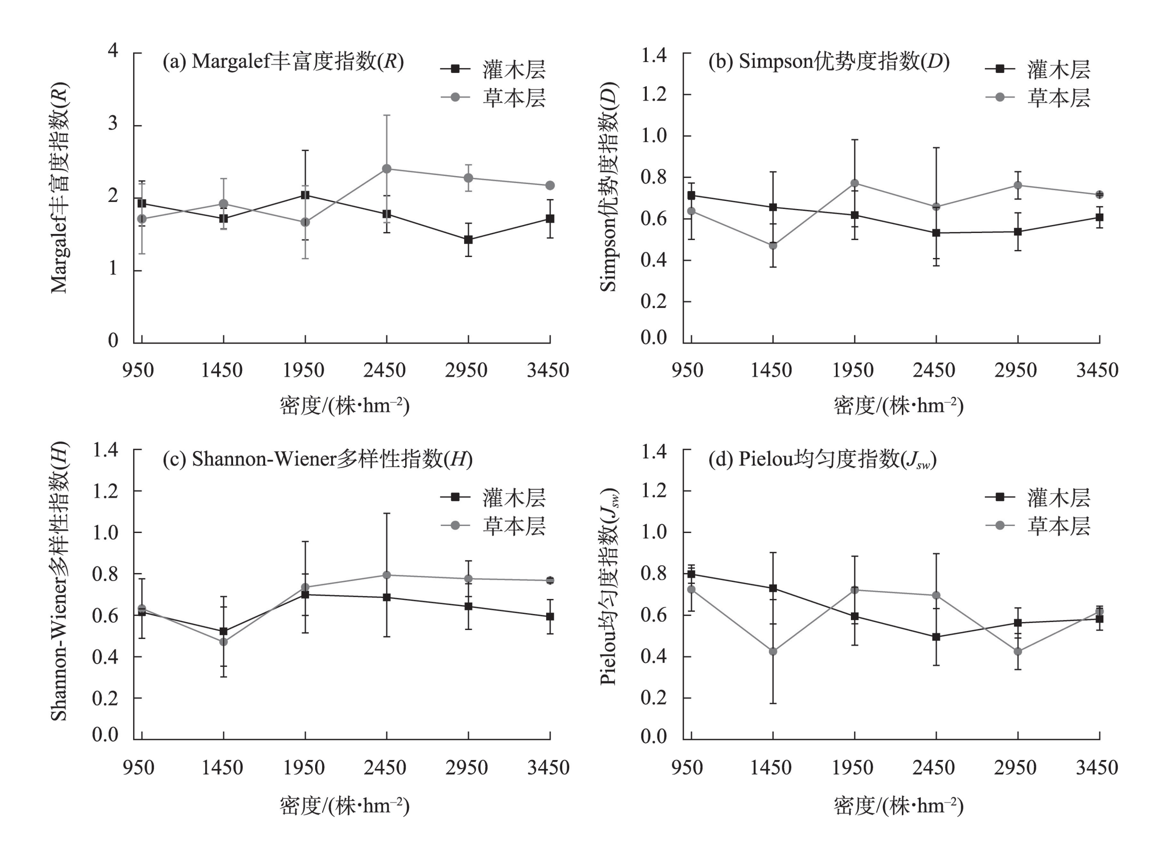


图4 不同密度刺槐林下植物群落物种多样性指数

Fig. 4 Understory community species diversity index of *Robinia pseudoacacia* plantation with different densities

表3 不同密度刺槐林下植物群落相似性系数

Tab. 3 Similarity coefficient of *Robinia pseudoacacia* plantation understory communities with different densities

密度/(株·hm^{-2})	950	1450	1950	2450	2950	3450
950	1	–	–	–	–	–
1450	0.7075	1	–	–	–	–
1950	0.7500	0.7203	1	–	–	–
2450	0.7281	0.7258	0.7381	1	–	–
2950	0.6900	0.7211	0.7222	0.6693	1	–
3450	0.6076	0.7451	0.7053	0.6774	0.8023	1

林下物种组成较相似,低密度与高密度群落林下物种组成相似性较低。

3 讨 论

3.1 林分密度对刺槐林下植物群落组成特征的影响

本研究中,不同林分密度刺槐人工林各群落共调查到灌木16科29属36种,草本植物25科36属41种。随林分密度的增加,灌木层和草本层的科、属的数量均呈先增后减的变化趋势,灌草各层物种数在中等林分密度下物种数最多,物种总数也在中等密度时最多,高密度时最少。这与李国雷等[21]研究结果一致,他认为当林分密度过高时,种群数量的上升使种间竞争剧烈;当林分密度过低时,刺槐所占有的水、热、光的资源空间较大,个体充分发育,灌草群落的生长则更受到抑制。因此,林分密度过大或过小都不利于灌草群落的发育和拓展。当密度大于2450株·hm^{-2}时,灌木层物种数下降趋势较快,而草本层物种数下降趋势较缓,说明此林分密度下的刺槐林已限制灌木的存活,但对草本植物影响较小,这与张柳桦等[22]的研究结果相同。因此,从物种多样性保育的角度看,将林分密度设置在1950~2450株·hm^{-2}为合理的林分密度,使灌草各层物种数维持在相对较高的水平。

群落内优势种及伴生种不仅反映了群落结构的多样性,且较全面地反映了群落物种随环境的动态变化[23]。调查区域内灌草群落物种主要集中在蔷薇科、忍冬科、禾本科、菊科,这表明4科在干旱环境中有较强的适应性。从优势种的组成来看,灌木层中茅莓在6种密度的林分中均有分布且为优势种或亚优势种,这表明茅莓是该研究区的主要适生种。此外黄刺玫、白首乌(*Cynanchum bungei*)、杠柳、臭椿(*Ailanthus altissima*)、紫丁香、藺草、针叶薹草、铁杆蒿、青蒿(*Artemisia carvifolia*)等植物在各样地中均有出现,说明上述物种可以对不同林分密度的环境能够较好的适应,在黄土区植被恢复过程应当优先考虑。

研究发现不同林分密度下刺槐林群落优势种有较多重叠,但重要值有所不同。随着林分密度的增加,刺槐林下物种呈现出阳生性→中生性→阴生性的演替格局,这与孙千惠等[24]的研究结果一致。当林分密度较低时,林内光照条件较好,灌木层优势物种多为黄栌(*Cotinus coggygria*)、六道木(*Abelia biflora*)等喜光物种,且调查时发现样地内存在栾树(*Koelreuteria paniculata*)、细裂槭(*Acer stenolobum*)、榆树(*Ulmus pumila*)、山楂(*Crataegus pinnatifida*)、山桃(*Amygdalus davidiana*)等落叶小乔木幼苗,长势良好,草本层中优势种多为藺草、黑麦草(*Lolium perenne*)等禾本科植物。当密度为1950株·hm^{-2}时主要优势种出现了芦苇,该物种多生于湿润地带,这表明中等密度的林分土壤水分条件较适宜,更有利于刺槐人工纯林向混交林的演替。随林分密度增加,乔木层郁闭度升高,林内光照条件减弱,一些中生性植物逐渐增多,紫丁香、连翘(*Forsythia suspensa*)、杠柳、土庄绣线菊等中生性灌木逐渐占据优势地位,重要值排名靠前;草本层中以铁杆蒿为主的菊科植物优势开始显现,与禾本科植物共建群落。当密度高于2950株·hm^{-2}时,林下环境条件发生变化,不再适宜耗水量较大的植物生长,导致茅莓的重要值降低,灌木层中白刺花、酸枣(*Ziziphus jujuba*)等耐旱耐瘠薄等物种重要值较大,有替代黄刺玫等蔷薇科植物优势地位的趋势;草本层优势种阴生性的青杞(*Solanum septemlobum*)、沼生繁缕(*Stellaria palustris*)、葎草(*Humulus scandens*)等重要值排名靠前。可见当林分密度过大时,林下光照及水分条件较差,致使林下部分抗逆、抗干扰能力弱的物种逐渐衰退,一些耐旱性、适应性强的物种逐渐成为优势种。

3.2 林分密度对刺槐林下植物群落生长特征的影响

本研究选取了灌草群落的高度、盖度、地上生物量指标分析了林下植物群落生长特征的变化。植被高度、盖度和地上生物量的增加可以提高植被拦截降水,减少溅蚀的作用,有利于林地保育土壤和涵养水源功能[25]。林分密度对林下植物群落的生长特征的影响并不显著,但直接影响光照分配,间接影响林下植物群落的生长[26]。蔡家川流域内低密度林分下灌草群落总生物量及灌木层生物量明显高于其他林地,这与前人的研究结果一致[27]。研究结果显示,灌木层平均高度、灌草群落总生物量随林分密度的增加呈现逐渐递减的趋势。在密度为950株·hm^{-2}时,灌木层平均高度、灌草群落总生物量最大,灌木层生物量占据优势。这主要因为较低密度的林分乔木冠层郁闭度小,而灌木层位于

乔木层之下,所受的光照及养分条件更好,促进了灌木的生长。草本层生物量无明显规律性变化,这可能是因为相比较于灌木层,草本层可利用的光照资源更少,因此对植物生长产生的影响较小。陈杰等[28]认为草本植物多属于逆境耐受型,对环境的变化能够较好的适应。随林分密度的增加,林分郁闭度升高限制了光照条件,对植物生长产生影响,灌木层高度及总生物量降低;灌草群落总盖度在不同密度的林分间差异并不明显,波动幅度较小,这一结果与前人的研究结果相似[29]。

此外,何欣月等[30]在黄土丘陵区4个典型区域内对植物群落进行了多样性分析,其研究结果指出0~100 cm土壤含水量与植物群落高度、盖度、生物量呈显著正相关。黄土区水分资源匮乏,地下水埋藏较深,土壤水分是限制植物生长发育的重要因子,林分密度过高会造成土壤水分的过量消耗,对植物个体生长发育产生影响[31]。

3.3 林分密度对刺槐林下植物群落物种多样性的影响

研究发现,林分密度对于Margalef指数、Shannon-Wiener指数、Simpson指数和Pielou指数均无显著影响,与前人研究结果一致[32],其原因可能是刺槐林未经抚育,群落相似度较高的原因,导致林分密度对刺槐群落物种多样性的影响不大。曲红[33]通过对不同林分、林龄、立地条件和配置下人工林物种多样性进行比较,认为林分密度是影响人工林群落物种多样性的重要因子。

除Margalef指数外,其余三种多样性指数数值均偏低,说明蔡家川流域刺槐林下植物群落结构较简单,且稳定较低[34]。灌木层Margalef指数、Shannon-Wiener指数均在密度1950株·hm^{-2}处出现峰值,草本层的最大值均出现在2450株·hm^{-2}处,可见中等密度的林分物种组成最丰富,多样性最高。原因可能是在中等密度下,中生性和阴生性物种逐渐增多,所以物种丰富度增加。灌木层Pielou指数、Simpson指数随着林分密度的增加呈降低趋势,说明林分密度越高,林内生境均匀度较低,优势种的优势度降低。林分密度越低,植物光合作用增强,林下可利用空间增大,因此植物长势更优且分布均匀,而草本植物相比于灌木,在高密度林分内能更快的适应环境变化,多样性更高且分布均匀。舒韦维等[35]对4种林分密度杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林林下物种多样性进行研究,他的研究结果表明灌木层Simpson指数、Pielou指数随林分密度升高而降低,与本研究结果一致。

总体来看,当林分密度在1950~2450株·hm^{-2}时的刺槐林下植物群落物种多样性情况最优,说明该密度下刺槐林下植物群落所处环境适宜,有利于林下群落稳定结构的形成。因此,建议选取林分密度1950~2450株·hm^{-2}为最适林分密度,这与前人[36]得出的刺槐林密度为1775株·hm^{-2}时植被生长情况较好的研究结果基本相似。说明在造林时将林分密度设置在中等条件下,更有利于维持群落的物种多样性。

4 结 论

(1) 在调查的6种密度的林分中共有植物39科65属77种,其中灌木层植物共16科29属36种,草本植物25科36属41种,蔷薇科、菊科、禾本科、忍冬科的植物种类最多。灌木层物种数在林分密度为1950株·hm^{-2}时最多,草本层物种数在林分密度为2450株·hm^{-2}时最多。

(2) 刺槐林下植物群落中优势种随林分密度变化较明显,随林分密度的增加呈现阳生性→中生性→阴生性的演替格局。

(3) 刺槐林下植物群落中灌木高度、生物量随林分密度的增加而减小,草本植物生物量在各林分密度间无明显差异($P>0.05$);林下灌草层总盖度变化较小。

(4) 刺槐林下植物群落灌草层的4种物种多样性指数在各林分密度下无显著性差异。

参考文献(References):

[1] 郭文月, 沈文星. 森林植物物种多样性价值形成机理及评价方法[J]. 世界林业研究, 2020, 33(4): 118−122. [Guo Wenyue, Shen Wenxing. Value formation mechanism and evaluation method of forest plant species diversity[J]. World Forestry Research, 2020, 33(4): 118−122.]

[2] 李星, 辛智鸣, 董雪, 等. 敦煌北山及马鬃山地区植物群落β多样性及其解释[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1464−1472. [Li Xing, Xin Zhiming, Dong Xue, et al. β diversity and interpretation of plant communities in Beishan and Manongshan areas of Dunhuang[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1464−1472.]

[3] Manning P, Fons V D P, Soliveres S, et al. Redefining ecosystem multifunctionality[J]. Nature Ecology & Evolution, 2018, 2(9):

427–436.

[4] Gamfeldt L, Roger F. Revisiting the biodiversity-ecosystem multifunctionality relationship[J]. Nature Ecology & Evolution, 2017, 1(7): 0168.

[5] 刘建利, 李凯荣, 易亮, 等. 黄土高原丘陵区人工刺槐林林分结构及林下植物多样性研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(3): 49–52, 70. [Liu Jianli, Li Kairong, Yi Liang, et al. Structure of *Robinia pseudoacacia* plantation and undergrowth plant diversity in the hilly area of the Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(3): 49–52, 70.]

[6] 王媚臻, 毕浩杰, 金锁, 等. 林分密度对云顶山柏木人工林林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 981–988. [Wang Meizhen, Bi Haojie, Jin Suo, et al. Effects of stand density on understory species diversity and soil physicochemical properties of a *Cypress funrbris* plantation in Yunding Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): 981–988.]

[7] 王敏, 周润惠, 余飞燕, 等. 不同林龄桉树人工林林下物种多样性和生物量的动态变化[J]. 植物研究, 2021, 41(4): 496–505. [Wang Min, Zhou Runhui, Yu Feiyan, et al. Dynamic changes of understory species diversity and biomass in *Eucalyptus robusta* plantations at different ages[J]. Plant Research, 2021, 41(4): 496–505.]

[8] 李江文, 何邦印, 李彩, 等. 不同林龄刺槐林下植物群落物种组成及功能多样性差异分析[J]. 植物科学学报, 2022, 40(3): 315–323. [Li Jiangwen, He Bangyin, Li Cai, et al. Differences in species composition and functional diversity of understory plant communities of *Robinia pseudoacacia* L. stands with different ages[J]. Plant Science Journal, 2022, 40(3): 315–323.]

[9] 缪宁, 周珠丽, 史作民, 等. 岷江冷杉林皆伐后次生群落结构和物种多样性的演替动态[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3661–3671. [Miu Ning, Zhou Zhuli, Shi Zuomin, et al. Succession dynamics of community structure and species diversity after clearcutting of faxon fir (*Abies faxoniana*) forest stands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(13): 3661–3671.]

[10] 云慧雅, 毕华兴, 焦振寰, 等. 晋西黄土区不同林分类型和密度条件下林下灌草组成及多样性特征[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(3): 569–578. [Yun Huiya, Bi Huaxing, Jiao Zhenhuan, et al. Composition and diversity of understory plants under different stand types and densities in loess region of western Shanxi Province[J]. Journal of Zhejiang Agricultural and Forestry University, 2023, 40(3): 569–578.]

[11] 赵耀, 王百田. 晋西黄土区不同林地植物多样性研究[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(9): 45–54. [Zhao Yao, Wang Baitian. Plant diversity of different forestland in loess region of western Shanxi Province, northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(9): 45–54.]

[12] Burkhart H E. Comparison of maximum size-density relationships based on alternate stand attributes for predicting tree numbers and stand growth[J]. Forest Ecology & Management, 2013, 289(38): 404–408.

[13] Ashfaq A, Dong D, Kashif A, et al. Response of understory vegetation, tree regeneration, and soil quality to manipulated stand density in a *Pinus massoniana* plantation[J]. Global Ecology and Conservation, 2019, 20(6): e00775

[14] 秦伟, 朱清科, 张宇清, 等. 陕北黄土区生态修复过程中植物群落物种多样性变化[J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 403–409. [Qin Wei, Zhu Qingke, Zhang Yuqing, et al. Dynamics of plant community species diversity in the process of ecological rehabilitation in north Shanxi loess area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(2): 403–409.]

[15] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2016, 31(1): 14–22. [Shao Ming'an, Jia Xiaoxu, Wang Yunqiang, et al. Review of studies on dried soil layers in the Loess Plateau[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(1): 14–22.]

[16] 魏曦. 晋西黄土区典型人工林分结构与水土保持功能耦合关系研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2018. [Wei Xi. Coupling Relationships between Artificial Stand Structure and Soil and Water Conservation Function in the Loess Region of Western Shanxi [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018.]

[17] 金锁, 毕浩杰, 刘佳, 等. 林分密度对云顶山柏木人工林群落结构和物种多样性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(1): 10–17. [Jin Suo, Bi Haojie, Liu Jia, et al. Effects of stand density on community structure and species diversity of *Cypress funebris* plantation in Yunding Mountain, southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(1): 10–17.]

[18] 李玉婷. 晋西黄土区典型人工林特征及土壤水分动态研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2021. [Li Yuting. Study on Characteristics of Typical Vegetation and Soil Moisture Dynamic in the Loess Plateau of Western Shanxi Province[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.]

[19] 陈加伟, 褚建民, 甘红豪, 等. 浑善达克沙地长梗扁桃群丛特征及其驱动因素分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(5): 777–784. [Chen Jiawei, Chu Jianmin, Gan Honghao, et al. Association characteristics of *Amygdalus pedunculata* and the environmental factors driving them in Otindag Sandy Land[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(5): 777–784.]

[20] 张博文, 秦娟, 任忠明, 等. 坡向对北亚热带区马尾松纯林及不同针阔混交林型林下植物多样性的影响[J]. 生态环境学报, 2022, 31(6): 1091–1100. [Zhang Bowwen, Qin Juan, Ren Zhongming, et al. Effects of slope aspect on understory plant diversity of *Pinus massoniana* pure forest different coniferous and broadleaved mixed forest types in north subtropical region[J]. Ecology and Environment Sciences, 2022, 31(6): 1091–1100.]

[21] 李国雷, 刘勇, 吕瑞恒, 等. 华北落叶松人工林密度调控对林下植被发育的作用过程[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(1): 19–24. [Li Guolei, Liu Yong, Lv Ruiheng, et al. Respones of understory vegetation development to regulation of tree density in *Larix*

principis plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(1): 19–24.]

[22] 张柳桦, 齐锦秋, 柳苹玉, 等. 林分密度对桉树人工林群落结构和物种多样性的影响[J]. 西北植物学报, 2018, 38(1): 166–175. [Zhang Liuhua, Qi Jinqiu, Liu Pingyu, et al. Effects of stand density on community structure and species diversity of *Eucalyptus robusta* plantation[J]. Acta Botanica Boreali- Occidentalia Sinica, 2018, 38(1): 166–175.]

[23] 郝文芳, 杜峰, 陈小燕, 等. 黄土丘陵区天然群落的植物组成、植物多样性及其与环境因子的关系[J]. 草地学报, 2012, 20(4): 609–615. [Hao Wenfang, Du Feng, Chen Xiaoyan, et al. Composition and diversity analysis of natural-communitiy plants in Loess hilly region[J]. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(4): 609–615.]

[24] 孙千惠, 吴霞, 王媚臻, 等. 林分密度对马尾松林林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(3): 732–738. [Sun Qianhui, Wu Xia, Wang Meizhen, et al. Effects of stand density on understort species diversity and soil physicochemical properties of *Pinus massoniana* plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(3): 732–738.]

[25] 许智超. 陕北黄土区植被恢复及人工林可持续性评价——以吴起县为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2011. [Xu Zhichao. Vegetation Restoration and Plantation Sustainability Assessment on the Loess Plateau: A Case Study of Wuqi Country, Shanxi[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.]

[26] 赵江平. 人工刺槐中龄林密度和抚育年限对林分组成结构、植物功能性状和土壤性质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022. [Zhao Jiangping. Effects of Mid- aged Forest Density and Tending Years of Artificial Robinia pseudoacacia on Stand Composition Structure, Plant Functional Traits and Soil Properties[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2022.]

[27] 丁凯, 张毓婷, 张俊红, 等. 不同密度杉木林对林下植被和土壤微生物群落结构的影响[J]. 植物生态学报, 2021, 45(1): 62–73. [Ding Kai, Zhang Yuting, Zhang Junhong, et al. Effects of Chinese fir plantations with different densities on understory vegetation and soil microbial community structure[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(1): 62–73.]

[28] 陈杰, 郭屹立, 卢训令, 等. 伊洛河流域草本植物群落物种多样性[J]. 生态学报, 2012, 32(10): 3021–3030. [Chen Jie, Guo Yili, Lu Xunling, et al. Species diversity of herbaceous communities in Yiluo River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(10): 3021–3030.]

[29] 王依瑞, 王彦辉, 段文标, 等. 黄土高原刺槐人工林郁闭度对林下植物多样性特征的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(2): 305–314. [Wang Yirui, Wang Yanhui, Duan Wenbiao, et al. Effects of canopy density on the characters of understory plants in *Robinia pseudoacacia* plantations on the Loess Plateau of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(2): 305–314.]

[30] 何欣月, 王宁, 刘均阳, 等. 黄土丘陵区植物群落多样性及生物量随土壤水分梯度变化特征[J]. 生态学杂志, 2021, 40(1): 31–40. [He Xinyue, Wang Ning, Liu Junyang, et al. The variation of plant community diversity and biomass along a soil water gradient in loess hilly region[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(1): 31–40.]

[31] 郭忠升, 邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1640–1647. [Guo Zhongsheng, Shao Ming'an. Soil water carrying capacity of vegetation and soil desiccation in artificial forestry and grassland in semi-arid regions of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(8): 1640–1647.]

[32] 温晶, 张秋良, 李嘉悦, 等. 间伐强度对兴安落叶松林林下植被多样性及生物量的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(5): 95–100, 118. [Wen Jing, Zhang Qiuliang, Li Jiayue, et al. Effects of intensity on diversity of undergrowth vegetation and biomass of *Larix chinensis* forest[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2019, 39(5): 95–100, 118.]

[33] 曲红. 晋西黄土高原人工林营造对植物多样性的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2008. [Qu Hong. Effect of Artificial Forest Construction on Plant Diversity in Shanxi Loess Plateau[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.]

[34] 陈聪琳, 孙一淼, 龚利梅, 等. 不同密度路域巨桉人工林群落结构和物种多样性[J]. 森林与环境学报, 2022, 42(1): 20–28. [Chen Conglin, Sun Yimiao, Gong Limei, et al. Community structure and species diversity of *Eucalyptus grandis* plantation with different stand densities in road area[J]. Journal of Forest and Environment, 2022, 42(1): 20–28.]

[35] 舒韦维, 卢立华, 李华, 等. 林分密度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(11): 4521–4530. [Shu Weiwei, Lu Lihua, Li Hua, et al. Effects of stand density on understory vegetation and soil properties of *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(11): 4521–4530.]

[36] 王珊珊. 晋西黄土区刺槐林分密度定向调控研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2021. [Wang Shanshan. Directional Regulation of *Robinia pseudoacacia* Forest Density in the Loess Plateau in Western Shanxi, China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.]

Understory plant community diversity of *Robinia pseudoacacia* plantation with different densities in the loess plateau of western Shanxi Province

WANG Siqi[1], ZHANG Jianjun[1,2,3,4], ZHANG Yanqin[5], ZHAO Jiongchang[1], HU Yawei[1], LI Yang[1], TANG Peng[1], WEI Zhaoyang[1]

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, Chinese National Ecosystem Research Network, Jixian 042200, Shanxi, China; 3. State Forestry Administration Key Laboratory of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 4. Forestry Ecology Engineering Research Center, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 5. Jixian County Hongqi Forestry Farm in Shanxi Provience, Jixian 042200, Shanxi, China)

Abstract: Stand density has an important effect on understory plant community structure and species diversity of *Robinia pseudoacacia* plantations. Identifying changes of understory plant community structure and species diversity under different stand densities is helpful for vegetation restoration and improving forest ecological function in loess regions. Taking a *R. pseudoacacia* plantation in the Loess area of western Shanxi as the focus of study here, the understory community composition characteristics, growth characteristics, and species diversity associated with six stand densities (950, 1450, 1950, 2450, 2950 and 3450 trees·hm^{-2}) were analyzed through field investigation. The following results were obtained: (1) The study identified 77 species of understory plants in 65 genera in 39 families, including shrubs of 36 species from 29 genera in 16 families, and herbs of 41 species from 36 genera in 25 families. The number of species in the shrub layer peaked when the stand density was 1950 trees·hm^{-2}, and the number of species in the herb layer peaked when the stand density was 2450 trees·hm^{-2}. The understory community of *R. pseudoacacia* forest mainly consists of Rosaceae, Compositae, Gramineae, and Caprifoliaceae. With increasing stand density, the dominant species transition from heliotropic species and intermediate species to shade species. (2) The height and aboveground biomass of shrubs decreased with increasing stand density. The aboveground biomass of herb layer had no significant difference among stand densities (P>0.05), and the total coverage of shrub and grass community showed little change. (3) With increasing stand density, Margalef richness index and Shannon-Wiener diversity index of the shrub layer first increased and then decreased, and peaked when the stand density was 1950 trees·hm^{-2}, while the Simpson dominance index and Pielou evenness index showed gradually decreasing trends. The Margalef richness index and Shannon-Wiener diversity index of the herb layer peaked when the stand density was 2450 trees·hm^{-2}, while the Simpson dominance index and Pielou evenness index peaked when the stand density was 1950 trees·hm^{-2}. (4) The similarity of species composition of understory communities in *R. pseudoacacia* forest of different densities was above the medium level. When the stand density was 1950−2450 trees·hm^{-2}, the understory community species diversity of *R. pseudoacacia* plantation was optimal, which was conducive to the improvement and sustainable development of its ecological function.

Keywords: stand density; *Robinia pseudoacacia* plantations; community structure; species diversity; loess region of western Shanxi Province